

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业光网白皮书

（2021 年）



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟（AII）

2021 年 4 月

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

声　　明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aii@caict.ac.cn

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

前 言

工业互联网作为我国新基建的国家战略肩负着产业升级和提高高端设备制造生产能力的重大发展使命。我国的工业企业前期发展主要聚焦在工业生产自动化和管理信息化上。随着工业互联网技术的发展，越来越多的工业企业希望以工业互联网为抓手提高生产效率、良率，以及实现生产管理智能化。在众多的工业互联网技术中，工业光网凭借其高效、灵活、易管控等网络特点使其作为工业互联网中有线网络的一种部署方案涌现出来。

工业光网采用光通信技术互联工业企业生产要素，以光纤作为传输媒质，使网络具有高带宽、低时延、低损耗、抗干扰等特点，可满足企业在智能制造的生产及管理过程中对网络性能提出的要求。我国作为全球最大的全光基础网络部署国，光产业蓬勃发展，可以提供面向不同工业场景下光互联的整体解决方案。本文档对工业光网的概念、架构、应用范围及行业部署场景等多个方面进行了阐述。

本文档由中国信息通信研究院牵头，工业互联网产业联盟多家成员单位参加编写完成。主要参与单位有：华为技术有限公司、中国电信集团有限公司。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

牵头编写单位：中国信息通信研究院

参与编写单位：华为技术有限公司、中国电信集团有限公司

编写组成员（排名不分先后）：

中国信息通信研究院：曹小波、刘谦、张恒升、汤瑞

华为技术有限公司：李汉国，张彦兵，罗秋雁，程雨，黄琨

中国电信集团有限公司：孙慧、金嘉亮、蒋铭

目 录

一、工业光网概述……1
（一）工业光网的建设背景……1
（二）工业光网的概念……4
（三）工业光网的总体架构……6
二、工业光网的应用范围和行业部署场景……8
（一）工业光网的应用范围……8
（二）工业光网的行业应用场景……11
三、工业光网的典型技术……27
（一）工业 OTN……27
（二）工业 PON……30
（三）工业光总线……35
（四）其他……39
四、工业光网的建设建议……43
（一）建设目标……43
（二）建设原则……44
（三）建设思路……44
五、工业光网的发展趋势……45
附录：现场勘查……47

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

一、工业光网概述

（一）工业光网的建设背景

2015-2016 年国务院相继发布了《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》和《关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》，首先提出推动互联网与制造业融合，提升制造业数字化、网络化、智能化水平，加强产业链协作，发展基于互联网的协同制造新模式。2017 年 11 月，国务院印发了《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》，将工业互联网上升为我国“制造强国”的国家战略，《意见》指出应增强工业互联网产业供给能力，持续提升我国工业互联网发展水平，以推动现代化经济体系建设。2019 年的全国两会上，“工业互联网”成为“热词”写入《2019 年国务院政府工作报告》。在 2020 年的政府工作报告中，工业互联网成为我国新基建（新型基础设施建设）的核心战略，肩负着产业升级和企业转型高端设备制造生产能力的重大发展使命。

工业互联网作为实体经济数字化转型的关键支撑，网络属性是其中重要的组成部分，是工业互联网的基础底座。它实现了生产要素之间的数据传输和传输信息间的数据理解。在实际应用中可通过有线、无线方式实现工业互联网体系相关的人机物料法环以及企业上下游、智能产品、用户等全要素连接，实现端到端数据传输，并通过数据和信息在各要素、系统间的无缝传递，使得异构系统在数据层面能相互“理解”，从而实现数据互操作与信息集成的能力。优质的网络属性是工业企业实现生产自动化和管理信息化的坚实基础。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

在我国，工业企业前期发展主要聚焦在生产自动化。企业整体的信息化建设起步较晚，工厂内部网络并未能有效、按需连接和管理全部的生产要素。企业的不同生产网间，企业与第三方平台之间也并未做到充分的互联互通。工业网络具有很大的改造与发展空间，其中包括：

- 网络中存在信息孤岛：企业在部署工业网络时，前期主要聚焦于生产环节，而信息化、数字化建设起步较晚，导致生产管理网络未能覆盖必要的生产要素，部分生产网内仍然存在信息孤岛，无法实现按需的生产数据跨系统互通和融合分析；
- 工业网络设备国产化率不足：随着国际关系的复杂，传统非国产化工业网络设备的使用限制开始显现，同时针对工业企业的网络攻击也频繁出现。传统工业网络设备的国产化率不高，无法做到自主可控，具有企业信息泄露的安全性风险；
- 工业网络协议标准不统一，不开放： 目前工业现场总线和工业以太网的种类繁多，协议互不兼容，工业领域缺乏一套能够兼容、转换多种协议和数据建模分析的综合性解决方案，传统工业设备的自动化信息化改造成本较高；
- 传统设备组网结构不灵活：随着多元化的生产需求的出现，工业网络要求生产设备能够接入网络，新增设备节点可以随时加入网络但不影响网络中其他设备的运行。管理方面，用于生产设备可按需划分在不同生产域进行管理。在不同生产网间，企业与第三方平台之间也会根据管理协同的要求进行

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

网络的联通。相比之下传统的工业网络缺乏灵活扩展的能力，且不同厂家设备间的壁垒依旧存在；

- 复杂工业场景下网络部署难：工业应用场景复杂多样，部分场景的工业现场设备所处环境差，干扰大，部署端到端网络进行成产管理和控制的难度较大。

工业互联网产业联盟已经发布了《工业互联网体系架构（版本2.0）》，其中明确工业互联网的部署将为传统工业网络带来融合、开放、灵活的特点，未来的工业网络将向着以下的方向发展：

- 网络架构逐步融合：网络结构扁平化，实现IT网络与 OT 网络的逐步融合。此外高实时控制信息与非实时过程数据可共网传输；
- 网络更加开放：新型网络技术将实现网络各层协议间的解耦，推动工业互联网网络技术的开放。生产全流程的数据将换为统一的协议格式通过API接口开放给上层工业应用使用；
- 网络控制和管理更为灵活友好：网络形态灵活。支持根据业务灵活的进行网络调整，快速构建出生产环境。此外网络管理应具有友好的可视化界面；
- 网络设备自主可控：网络设备具有一定的国产化基础，可按需为企业提供自主可控的管理能力；
- 网络安全可靠：采用新型工业互联网技术部署的工业网络应保证在不同应用场景下安全可靠的运行。此外网络还具备保护和自愈能力。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

在工业互联网的众多网络技术类型中，工业光网凭借其高效、灵活、易管控等网络特点使其作为有线网络的一种部署形式涌现出来。工业光网采用的光网络技术已在公众电信网络中取得了广泛的应用，具有深厚的实践基础。在工业场景下，工业企业可以通过部署一张工业光网连接工业生产、环境监控与信息管理网络，降低了网络部署的层级和复杂性，为企业提供了高效、可靠的网络连接和数据互通能力。

（二）工业光网的概念

1.什么是光网络

光网络（Optical Network）通常是指采用光纤作为主要传输介质的广域网、城域网或者局域网。光网络技术不仅仅表示将数据简单的通过光纤进行传输，而是指在光纤这个基础的传输媒质上，利用先进的光电控制技术实现多节点网络互联和灵活调度，以使得网络具有天然的高带宽、低时延、低损耗、易运维、抗干扰的传输特点的网络技术。

光网络已经经历了多代的发展，不仅实现了全球光网络技术标准、光接口的统一，还定义了对光信号质量监控、故障定位和配置等重要的网络管理功能。2020 年 2 月，国际组织 ETSI 正式成立了第五代固定网络（F5G）工作组，研究新一代光网络，即全光网络的建设。全光网的发展目标是通过将光纤技术全面应用于各种场景，将我们熟知的“光纤到家”推进到“光联万物”。未来，光网络将向从全光联接（FFC）、增强型固定宽带（eFBB）、可保障的稳定体验

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（GRE）三个维度演进和发展，近年来通信业界高频率出现的千兆光纤网络所覆盖的关键领域，也正是全光网络所覆盖的关键领域。

2.工业网络与光网络结合

中国工业制造业经过近几十年的飞速发展，规模已经跃居世界第一，目前正处在转型的攻坚阶段，以完成量到质的转变，向高端制造业强国迈进。工业互联网是企业转型升级的抓手之一。与此同时，我国拥有全球最大的全光基础网络，也是光通信产业最蓬勃发展的国家之一。我国拥有多个世界领先的光通信技术公司。将光网络技术与工业相结合具备天然的条件和优势。此外光网络具有高带宽、低时延、低损耗、易运维、抗干扰的优点。这些优点可满足企业在智能制造转型升级过程中的网络需求，同时又可以保证其网络的安全、便捷和易用。

3. 工业光网的定义

工业光网是采用光网络技术互联工业企业全生产要素的组网形式，采用光纤作为传输媒质，属于工业互联网中有线网络。

工业光网不只是将工业以太网或工业总线简单承载在光纤中进行传输，而是采用已在公用电信网络中广泛应用的光网络技术，如PON、OTN技术等，为用户提供兼具保障性和扩展性的光网组网方案。企业可以通过建设一张全光网实现工业网络的生产控制、厂区监控、办公业务的统一接入等，完成人、机、物的全面互联。此外，还可以按照发展需要将工业光网与工厂内现有网络相结合，实现工业光网与工业以太网、5G、WIFI等网络技术的融合组网。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（三）工业光网的总体架构

1. 工业光网的总体架构

工业光网是工业 OTN、工业 PON、工业光总线等光网络技术的总称，整体架构示意图见图 1，企业可根据实际的建网需求部署：

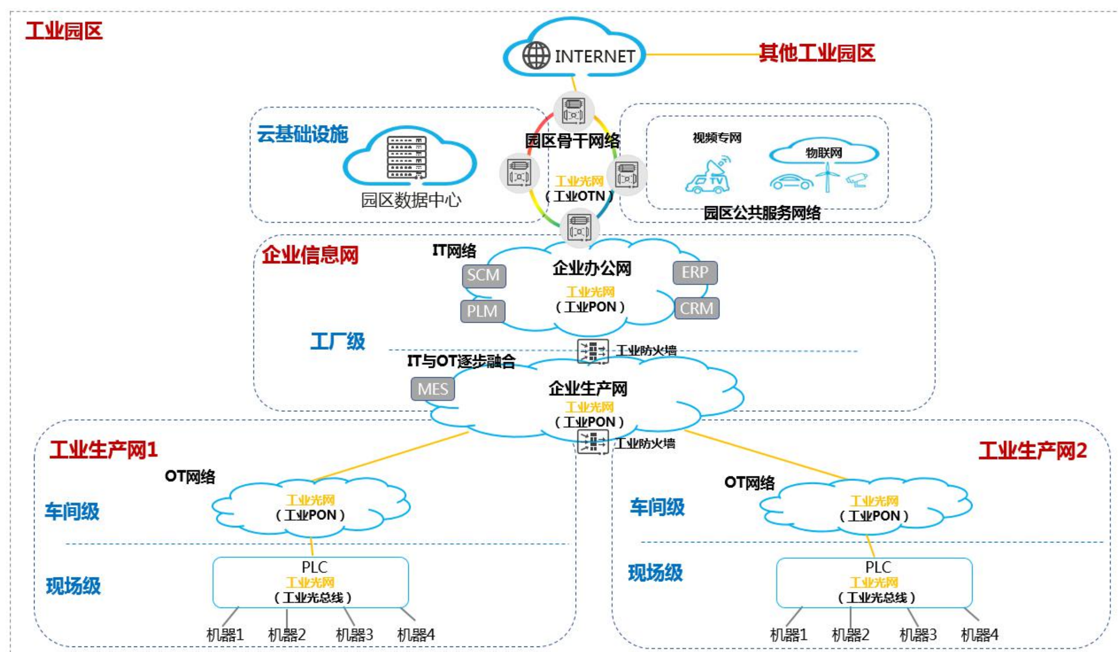


图 1 工业光网的体系架构图

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业 OTN 设备可以部署于工业园区网络中的园区骨干网，用于连接园区云基础设施、园区公共服务网络和企业生产网络，此外还可通过部署 OTN 网络实现不同园区的互联互通以及园区到公有云/公共客户网络的连接。

工业 PON 设备可以部署于企业车间级和工厂级，用于承载企业的生产、监控和办公业务。此外还可以通过在车间级部署工业 PON 设备实现工业协议的转换，为不同类型的现场级设备、传感器与企业信息管理和云服务平台之间提供基于标准化统一协议的业务承载能力。

工业光总线设备可以部署于企业生产网络中的现场级，用于现场级主站 PLC 之间，或主站与生产网内其他从站的全光总线互联。

2. 工业光网可实现的价值

工业光网具备传统光通信网络的优点，包括带宽容量大、损耗低、支持长距离传送、抗电磁干扰能力强、安全性能和保密性好等。此外针对工业网络的运行特点，工业光网有着良好的协议兼容性和管理自主可控能力，可以为工业企业带来可观的应用价值，具体包括:

- 自主运营和管理能力：工业光网可完全部署于企业内网，并可在企业内部设置管理平台，提供工业光网设备的自主运维和管理能力，使生产、管理数据均不出企业;
- 网络部署灵活便捷：在已部署的工业光网中新增业务节点，对正在运行的其他网络节点无影响。且工业光网部署中含有大量无源器件，无需外部电源供电，同时光纤本身具有长距离传输、抗电磁干扰、抗雷击的特点，适用于各类场景;
- 网络开放，可扩展性强：当产线升级或生产业务、流程变动时，工业光网可快速支持产线扩容和改造、支持柔性生产;
- 自主可控：工业光网设备已实现国产化，设备自主可控程度高，可以保证企业的信息安全自主治理的要求;
- 设备、接口标准化：工业光网具有国际标准化的设备体系和统一的接口类型，支持异厂家设备的互联互通;
- 设备兼容性：工业光网设备支持协议转换功能，可将工业现

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

场设备繁多的通信协议映射为统一的协议类型进行传输;

- 安全可靠性：当多节点同时失效时，网络中的其余光节点仍能保持正常通信。

根据以上对工业光网的概述，本白皮书将探讨如何将工业光网技术应用在工业领域，为企业提供一张高质量、高可靠、高兼容度、高安全性的网络，帮助企业便捷的实现生产要素全连接。

二、工业光网的应用范围和行业部署场景

（一）工业光网的应用范围

1. 工业园区网络

（1）园区内骨干网连接

园区骨干网主要指园区公共服务网，由于园区内企业众多，业务应用丰富，对网络带宽需求大（链路采用万兆甚至100G互联通道，接入的各企业侧需要采用千兆或者万兆互联），同时极为看重网络安全和传输可靠性。部署网络时，需要在设备性能、带宽能力、接入用户能力、安全防护等多个方面进行综合考虑。工业光网根据自身特点可以作为园区骨干网络的部署解决方案。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（2）跨园区协同

随着智能化生产和柔性制造方式的推广，企业需要面向订单对多个园区或园区内外的生产资源统筹调配，可在生产过程各环节同供应链并行组织生产方案，并可对生产运行状态进行监控。园区内

外协同应支持企业调配、组织不同生产网的资源、满足多个生产网的协同生产、支持多厂区的实时数据采集等。工业光网的硬管道、良好的业务隔离度和安全性是跨园区协同应用下很好的解决方案。

2. 企业管理网络

（1）企业信息网络互联

传统企业的信息网络分散部署着各类IT管理系统，如MES、PLM、ERP、SCM、CRM 等。为了打破信息孤岛、提高运营效率，会将上述分散部署在各服务器的IT系统集中部署到工厂内数据中心/云平台，进行数据的联合分析，快速决策。不同的部署方式会引起网络架构的变化。无论采用哪种部署方式，均可以采用工业光网连接各类IT管理系统模块，作为可靠的信息数据承载通道。

（2）企业管理云化

随着云技术的应用，一些企业的信息系统逐步尝试在企业内网与外网应用云技术。当前，越来越多的 IT 软件也基于云平台提供服务。企业与云基础设施的连接需求在增加。工业光网可作为连接工业生产网和企业信息网中云基础设施的可靠通道，也可作为企业私有云和公有云互联协同应用的业务承载网络。

（3）IT 和 OT 网络融合

工业互联网业务发展使工厂内网络呈现出融合、开放、灵活的发展趋势，其中融合趋势带来了网络结构的扁平化。传统的“两层三级”网络架构严重影响着信息互通的效率，随着大数据分析和边缘计算业务对现场级实时数据的采集需求，OT 网络中的车间级和现场级将逐步融合（尤其在流程行业），同时 MES 等信息系统向车间

和现场延伸的需求，推动了 IT 网络与 OT 网络的融合趋势。工业光网可以实现企业 IT 和 OT 的融合组网以及工业数据可靠有效的在 IT 和 OT 间传输。

3. 工业生产网络

（1）生产信息采集

生产环境的信息采集是数字化、智能化生产的重要前置条件，在工业互联网的智能工厂中，企业级IT管理运营系统对现场实时生产过程数据和设备运行状态数据有着强烈的需求。工业光网可以作为工业企业生产设备与企业IT管理运营系统间的数据承载通道，连接现场级设备与上层管理实体（如服务器、SCADA系统等），实现工业生产设备运行状态、运行环境、传感器数据等生产相关信息的采集，还可用于生产指令下达、厂区视频监控等重要业务数据的承载。

（2）边缘计算

未来超过70%的数据和应用将在边缘进行处理。在工业场景应用中，边缘计算在生产过程的预测性维护、产品的质量保证、以及流程优化方面对企业的生产经营有很大帮助。此外，企业还可以基于边缘计算平台提高生产工艺与流程的柔性，支撑个性化生产。工业光网可以提供边缘计算所需要的数据承载通道，还可在数据汇聚节点设备中集成计算算力，按需实现边缘计算功能。

（3）柔性生产调度

在个性化定制或批量定制过程中，生产会根据订单的切换而发生变化，这要求生产域能够根据需求进行灵活重构，智能机器可以

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

在不同生产域间调整和迁移。工厂内的网络架构须能够适应快速组网与灵活调整的需求，工业光网设备可以结合网络切片技术并采用集中管控以实现生产设备的灵活划域组合，并能够快速发现设备重新组网时出现的问题，指导现场人员快速进行处理。此外，工业光网还可以满足智能化生产对网络时延、抖动、带宽提的更高要求。

（二）工业光网的行业应用场景

工业光网的应用场景涵盖生产制造与企业信息化的各个环节。按照从内到外划分，主要包括企业内部各要素互联的智能化生产、个性化定制以及企业不同生产网和供应链之间的或企业与云平台之间的网络化协同等应用场景。

1. 工业光网在离散制造业的场景应用

（1）网络的特点和面临的挑战

离散制造业中的制造的产品往往由多个零件经过一系列并不连续的工序加工装配而成，因此涉及的生产终端类型较多，数字化生产背景下企业会非常关注产品各个生产环节的数据信息采集。一般离散制造企业车间生产过程中的数据通常包括物料、加工设备、工装、加工过程、质量等，涉及了制造执行中的各个环节，导致离散制造业车间管理过程复杂，接入终端数量繁多。总体来说，离散制造业的数据管理网络存在以下问题:

- 制品情况，成产设备关键数据未能按需送达管理层;
- 接入终端数量繁多，网络带宽无法支持;
- 数据采集的实时性不能满足要求，造成企业对市场变化的响应速度慢;

- 企业级管理信息难以深入到车间级和设备层;
- 传统交换机组网方案设计导致机柜多，网络重载。

（2）工业光网在传统汽车制造行业的应用和创造的价值

某汽车零件制造企业需要建立车间信息高速通道，实现现场级生产终端和数据采集、MES 等信息系统的高速连接。

经过多种方案比较，企业最终选择部署工业光网，基于工业 PON 技术建设其智慧制造车间高速网络和数据采集系统，组网架构见图 2。其组网方案为:

- OLT通过以太网接口上联SCADA系统，通过PON接口接入ONU设备，实现数控机床、拧紧机等工业设备与上层系统的联通;
- ODN系统利用现布放的光纤，在车间通信柜中增加分光器增加设备尾纤实现;
- ONU网络在安装车间通信柜中，利用现有五类线布线接入到各种数控机床、拧紧机以及工业设备。ONU采用模块化设计，基本单元不变，通过配置不同的模块适配不同的业务和协议，降低了部署成本;
- ONU下挂多业务智能工业数据采集网关系统，该网关集成有RS232/485、以太网、数字和模拟接口等多种输入资源，实现对各种总线的工业现场级设备的接入和数据采集。智能网关将采集到的信号进行统一的协议、数据转换，将车间生产基础数据信息采集汇聚到SCADA系统，为MES系统提供设备的实时信息，同时为MES系统提供设备管理和工艺下发的链路。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

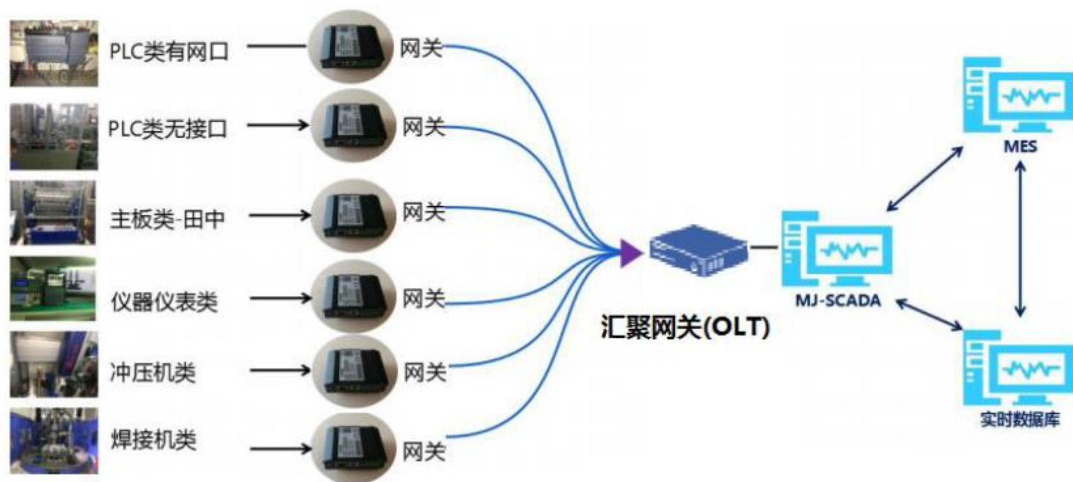


图 2 工业 PON 在智能化车间应用组网架构图

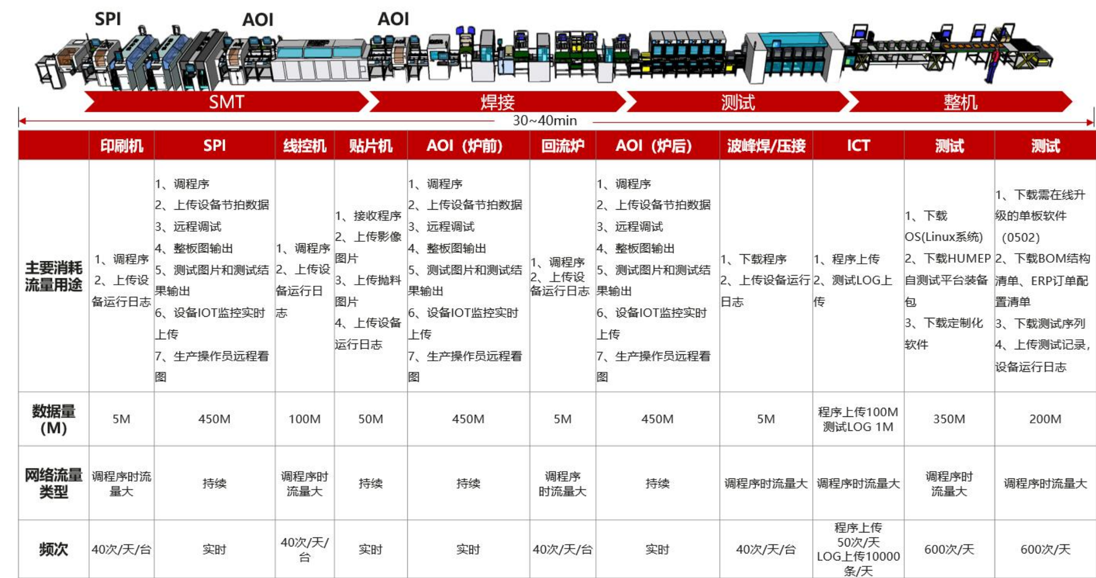
通过工业 PON 的部署为客户实现了以下价值:

- 实现了网络扁平化和大带宽、多业务承载：全光纤组网，采用二层扁平架构，实现弹性扩容。支持多业务接口，满足工业互联网生产控制、数据采集、无线专网承载、行政办公各种应用场景。实现低时延、大流量，满足承载工业控制、数据采集、无线承载等各种业务工厂实际应用需求;
- 实现了现场设备的数据采集分析：通过在工业智能网关中内置数据采集模块，能够低成本实现异构网络的联通和车间生产全基础数据的采集，客户通过监控和分析生产数据，实现了产线良品率的大幅提升，显著提高利润;
- 提高了网络稳定性和安全性：抗电磁干扰能力强，采用无源设备，组网简单，提高了网络稳定性。通过双路光纤保护、双机热备、工业级ONU满足了厂区安全性要求。

（3）工业光网在智能化产线的场景应用和创造的价值

图3是某企业的智能电子元器件组装测试生产线中每个环节对其

工业网络的性能需求总览。



	印刷机	SPI	线控机	贴片机	AOI（炉前）	回流炉	AOI（炉后）	波峰焊/压接	ICT	测试	测试
主要消耗流量用途	1、调程序 2、上传设备运行日志	1、调程序 2、上传设备节拍数据 3、远程调试 4、整板图输出 5、测试图片和测试结果输出 6、设备IOT监控实时上传 7、生产操作员远程看图	1、调程序 2、上传设备运行日志	1、接收程序 2、上传影像图片 3、上传抛料图片 4、上传设备运行日志	1、调程序 2、上传设备节拍数据 3、远程调试 4、整板图输出 5、测试图片和测试结果输出 6、设备IOT监控实时上传 7、生产操作员远程看图	1、调程序 2、上传设备运行日志	1、调程序 2、上传设备节拍数据 3、远程调试 4、整板图输出 5、测试图片和测试结果输出 6、设备IOT监控实时上传 7、生产操作员远程看图	1、下载程序 2、上传设备运行日志	1、程序上传 2、测试LOG上传	1、下载OS(Linux系统) 2、下载HUMEP自测试平台装备包 3、下载定制化软件	1、下载需在线升级的单板软件（0502) 2、下载BOM结构清单、ERP订单配置清单 3、下载测试序列 4、上传测试记录，设备运行日志
数据量（M)	5M	450M	100M	50M	450M	5M	450M	5M	程序上传100M 测试LOG 1M	350M	200M
网络流量类型	调程序时流量大	持续	调程序时流量大	持续	持续	调程序时流量大	持续	调程序时流量大	调程序时流量大	调程序时流量大	调程序时流量大
频次	40次/天/台	实时	40次/天/台	实时	实时	40次/天/台	实时	40次/天/台	程序上传50次/天 LOG上传10000条/天	600次/天	600次/天

图3 智能电子元器件组装测试生产线网络性能需求总览

企业智能化产线的生产流程包括SMT贴片加工、焊接、测试、整机等环节。企业很快发现现有的工业网络性能无法支持智能化的生产模式，具体表现在:

- AOI高清晰度的过程图片达到450M/张，每天上传照片1200张+/台，数据量大，只能经过压缩才能上传。压缩后可到20¯30M，但由于压缩比较大，清晰度只能支撑基本分析;
- 部分现场级生产终端的日志要求达到秒级实时上传，且经常有数据丢失现象;
- 贴片机抛料、贴片影像文件每台设备均会生成，每台设备每天生成的文件量巨大，可达到1万+个，目前无法支撑数据的实时上传。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业企业通过选择工业PON技术组建支撑其智慧制造车间高速业务承载和数据采集的网络，组网架构见图4。组网方案为:

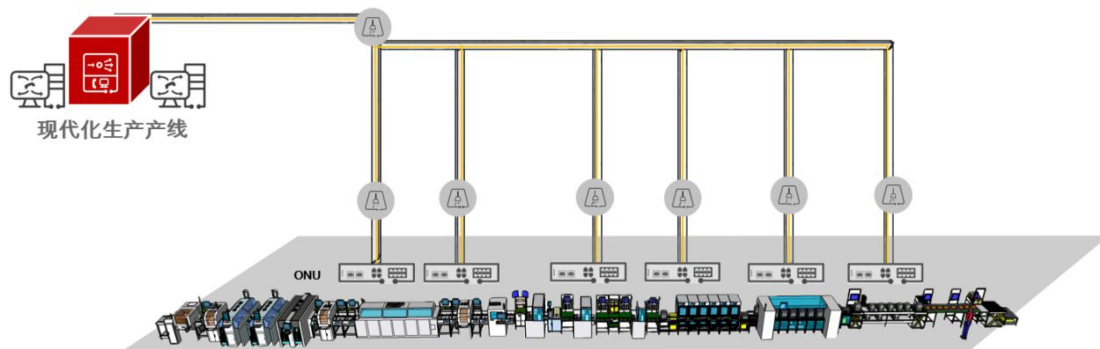


图4 智能产线采用工业PON技术组网架构图

- ONU安装在线槽立柱内以节省空间;
- 采用两级分光以连接不同区域的生产设备，其中一级分光器安装在桥架线槽内；二级分光器安装在本槽立柱内。

通过工业光网的部署为客户实现了以下价值:

- 实现了各类生产终端的网络连接，通过部署工业PON设备提供了足够的带宽承载能力。可以满足大带宽应用，如AOI高清晰度照片的传输等，工业企业利用生产终端上送的数据实现更深度的分析功能;
- 业务通过光纤承载和基于时分复用的通道化传输方式，大大降低了传输时延，有利于承载时延敏感的数据业务，如贴片机日志信息等;
- 网络部署通过大量ONU和小型化的无源器件，无需额外的机房，相比传统交换机方案提供了更灵活部署方式。

2. 工业光网在智慧矿山的行业应用

（1）网络的特点和面临的挑战

智慧矿山的建网环境非常复杂，很多的作业环境是在深井下。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

为实现采矿工作面和掘进工作面的智慧化，网络的部署既要能覆盖井上的设备生产区、办公管理区、职工生活区，又需覆盖各类深井下的生产区域。网络功能方面，既要提供生产终端设备的信息上传，还要提供矿山整体环境的监控功能。这都对网络的可靠性、稳定性、安全性、灵活性和扩展性提出了很高的要求。

（2）工业光网的应用

工业光网解决方案以其安全可靠、极简部署、可视运维、灵活扩展等特点适用于矿山安全监控网及远程生产网络；同时为矿山园区及生活区提供高质量的办公和生活网络覆盖，是建设智慧矿山网络的理想方案。以某煤矿企业为例，企业当前网络采用的是以太网环网，连接分布在井上和井下各个机房及变电所的交换机上，由于有线网络传输距离近、维护节点多，并不能连接覆盖矿区全部的自动化设备。企业希望通过升级原有网络提高生产园区的生产设备入网率，建设生产设备的数据采集系统，另一方面希望通过网络升级实现全矿井管控一体化，同时保证数据传输质量的安全性、可靠性及网络设备未来的可扩容性以及易维护性。

最终该企业选择部署工业光网的工业 PON 技术建设其矿区数据采集系统。在光纤资源稀缺的情况下，可以采用合分波方式，节省光纤资源，组网架构见图 5。组网方案为:

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

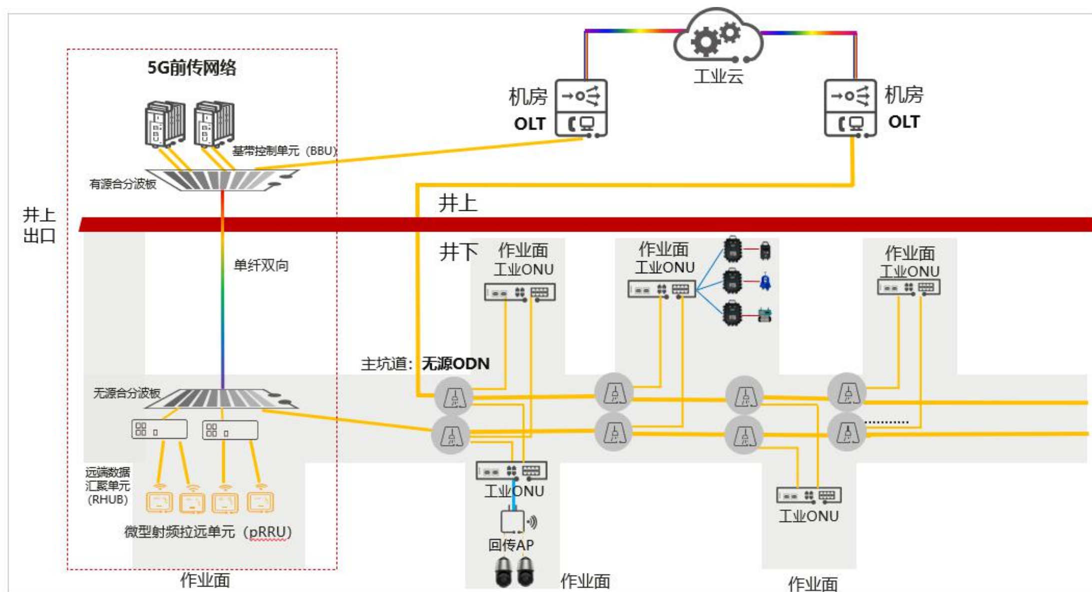


图 5 工业光网应用于矿山行业的组网架构图

- 工业光网基于成熟的工业PON技术，矿井上的调度室中心机房配置双OLT（主用与备用），地面和井下采用工业ONU设备连接生产终端;
- 通过单根光纤实现PON数据和5G数据的大带宽传输。井上OLT与BBU下发的数据通过有源合波设备合波，并通过单根光纤传输至井下，使用无源分波设备进行分波，OLT下发的数据经过PON网络传输至ONU，BBU下发的数据通过RHUB传输至pRRU;
- 地面和井下的ONU设备负责各区域的业务接入，各区域的设备将采取就近接入的方式接入工业ONU设备中;
- 采用光纤预连接的建设方案，光纤间采用预置连接盒的方式进行连接，无需在矿山现场进行熔纤，降低了现场熔纤的操作难度和施工危险性;
- 工业ONU设备负责将地面和井下将各区域的生产数据采集后

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

上传到地面调度机房的OLT设备中，再由OLT设备将数据上传到本地区的云数据管理平台；

- 考虑到矿区存在长链组网的应用场景，OLT与工业ONU的网络连接采用不等比分光器架构的手拉手保护的链式组网方式。
- 在光纤资源富余的情况下，可以采用5G数据与PON数据独立回传的方案。

（3）为客户创造的价值

- 通过工业光网的部署，实现了生产终端在井上与井下的按需数据采集，保证了其安全使用；
- 矿区采用光纤作为传输的媒介，可传输距离远，覆盖范围大，网络稳定性高；
- 井上到井下间全部为无源器件组网，降低了网络建设难度，也降低了防爆箱数量和防爆成本；
- 矿区传统采用交换机组网的方案，每个交换机都是IP管理节点，造成部分数据分散在矿下的众多位置。工业PON采用集中管理，所有数据都汇聚到OLT“大脑”，ONU像“四肢”，井下的工业ONU不是独立的管理节点，统一在OLT上进行集中管理。数据从井下全部迁移到井上，极大提升矿业安全，易于管理；
- 井下区域复杂，且涉及动态作业，需要灵活接入各种传感器、摄像头。工业ONU的部署形态较多，除传统的盒式形态外，还可采用小型模块化SFP ONU的形态。如终端设备支持，可

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

做到即插即用。同时，工业ONU承载WLAN AP的WiFi回传，对无法铺设光纤的地区也可采用无线方式接入;

- 矿山行业为重型作业现场，网络的保护和状态预警是应用与维护关注的关键问题。工业PON支持采用断纤检测技术，可以对部署的光纤精确到米进行检测，帮助矿区实现故障快速诊断，高效运维。同时支持多点断纤保护，提升了网络的安全性。

3. 工业光网在综合管廊场景的应用

（1）网络的特点和面临的挑战

综合管廊是地下城市管道的综合走廊，即在城市地下建造一个隧道空间，将电力、通信，燃气、供热、给排水等各种工程管线集于一体，是保障城市运行的重要基础设施。综合管廊中部署网络与矿山场景相似，都会受到环境的影响。由于综合管廊空间狭小，部分管廊环境较差，因此需要保证网络部署的健壮性和可靠性，如网络在单点或多点掉电/故障时其它节点仍能正常工作。采用传统的工业交换机方案部署管廊网络时存在缆线传输距离受限、网络节点供电难、无法提供链路保护等难点。而工业光网可以利用其架构中无源网络的部署特点，建设无需供电的光纤分配网络，且网络符合燃气管线等环境的防爆要求，非常适合在综合管廊场景应用部署。

（2）工业光网的应用

在某综合管廊网络建设项目中，用户希望为管廊内的生产终端设备（如隧道机器人）、监控设备、环境监测设备等提供统一的数

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

据回传网络。最终用户选择采用工业光网中的工业 PON 技术作为统一的回传网络。其组网架构见图 6。网络部署方案包括:

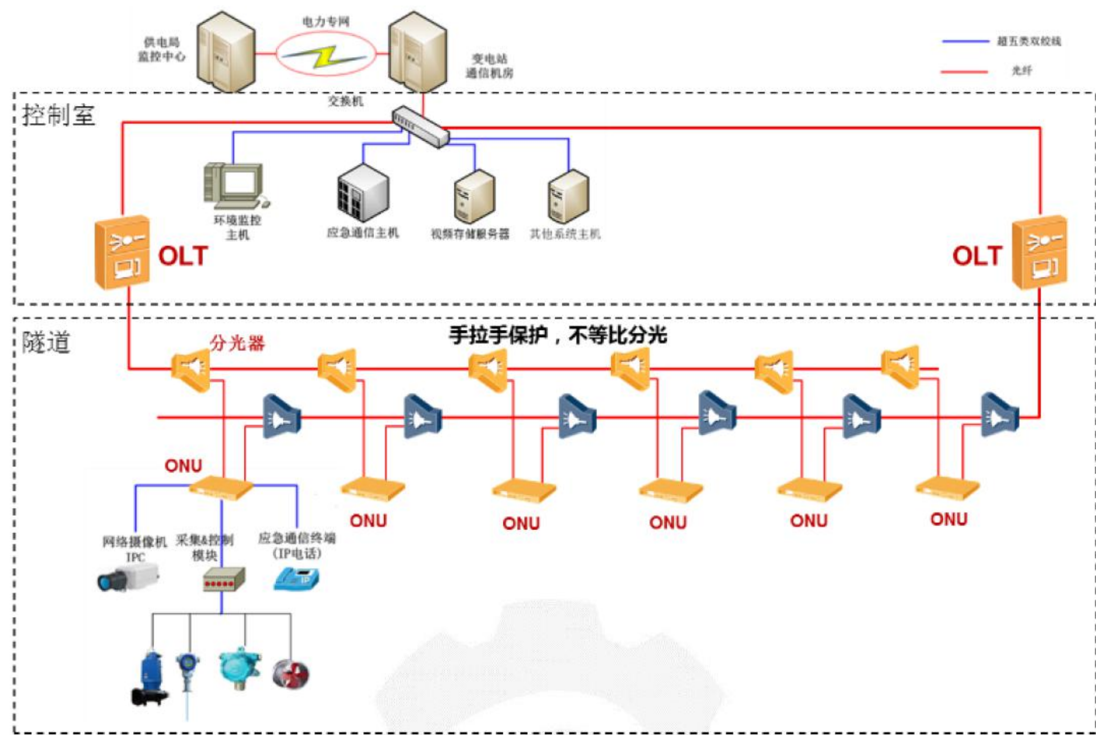


图 6 综合管廊应用组网架构图

- 管廊里的终端设备采用支持多业务接入的ONU设备，提供标准的RJ45接口接入大带宽视频业务，提供RS485适配传统窄带传感器数据接口，提供统一的光纤回传至OLT设备;
- ONU采用双上行双归属的方案，实现了路径与根设备的1+1备份。其中ONU采用链状组网，并采用了不等比分光和手拉手保护;
- 主备OLT设备放置于企业控制室内，双上联至控制室的核心交换机。

（3）为客户实现的价值:

- 在管廊的部署场景中，工业PON设备采用长链组网，同时ONU

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

采用了双上行双归属的方案，实现了路径与根设备的1+1备份，相对于传统工业交换机方案更具优势的数据传输方式，提升了网络的健壮性；

- 工业PON的组网方案中有大量的无源器件，可摆脱管廊中环境导致的供电限制；
- 采用光纤作为传输介质，可提供最远20公里的传输距离，适合管廊的长距离传输。

4. 工业光网在油气行业的应用

（1）网络的特点和面临的挑战

油气行业也在进行数字化转型，要实现“数字化”，首先需要将油气生产现场的资产和设备连接到工业网络中以实现生产的自动监控和诊断，之后需要连通不同的站场/作业区以及产业链相关方，实现生产、运输、物流、仓储的统一化管理。数字化转型带来了接入节点数量的增多，对网络的带宽容量有了更高的需求。此外油气行业传统网络接入点位置分散、部分接入点位距离可达十几公里，不同的作业区之间更可达几十公里，因此需要在接入网支持业务远距离接入的能力、在骨干网支持大跨段传输。另外油气行业对网络部署环境比较敏感，要求网络设备具有抗电磁干扰、防爆、防腐蚀的能力，也需要提供网络保护策略。

（2）工业光网的应用

在某油气田网络建设项目中，用户通过工业光网搭建了油气田

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

的数据传输网络，其组网架构见图7。

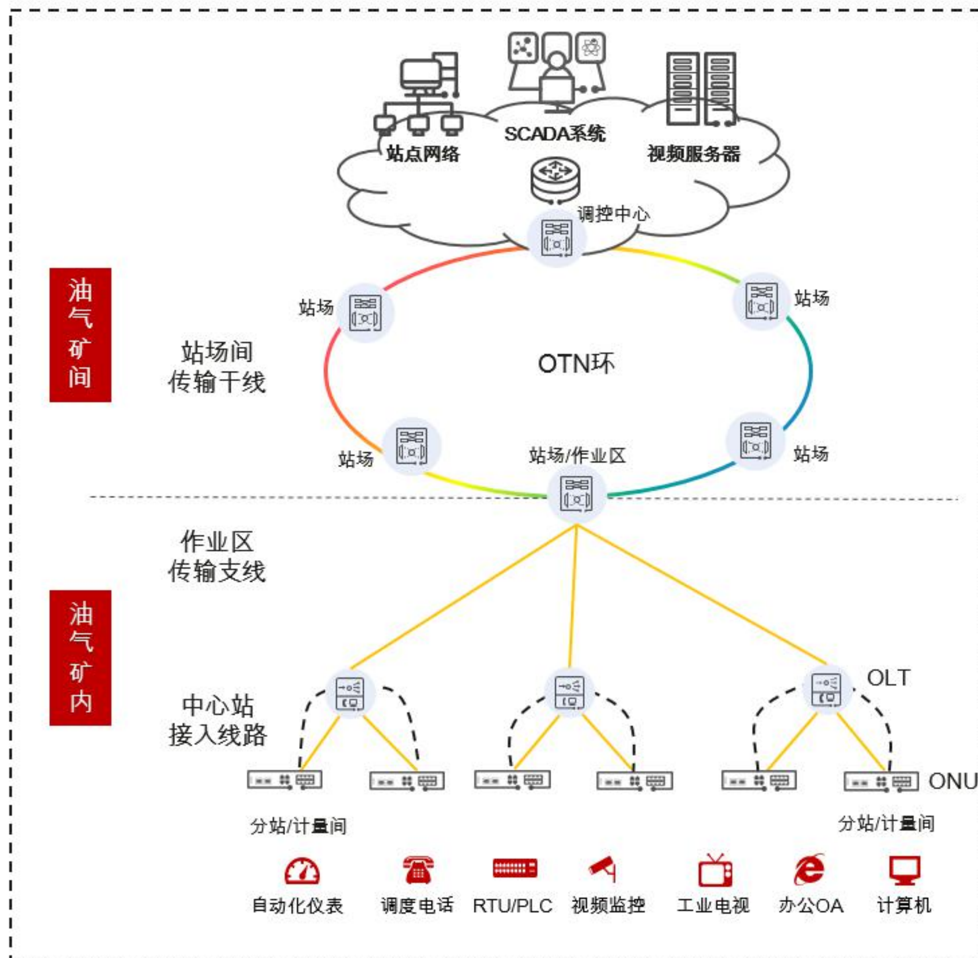


图7 工业光网在油气行业的应用组网图

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

油气田采用多级管理，包含分公司、气矿、作业区、中心站、分站等。在组网架构方面，作业区到中心站、中心站到分站采用树形网络结构，大部分距离小于20KM，以星型网络为主。而作业区间跨段距离可达几十公里，采用环网部署，具体工业光网的部署方案包括：

- 在分站与中心站间采用工业PON技术部署。其中将分站的每个接入点（PLC数据输出点、环境监控数据采集点等）接入

到工业ONU，每个ONU可接入多个接入点数据，并根据网络规模在每个分站设置多个接入点位;

- 在中心站放置OLT设备，数据通过分站的工业ONU接入到中心站的OLT设备，并通过OLT设备汇聚上送至数据管理平台;
- 在接入网网络安全方面，接入点采用工业PON的TypeC手拉手保护功能，提供端到端的双链路备份传输，遇到光纤中断可实现毫秒(ms)级的链路切换;
- 不同的站场/作业区间采用OTN技术组建环网互联，可以提供大带宽的同时又能保证网络的安全性和生存能力，以满足未来数字油田建设对高带宽的需求。
- 在骨干网的网络安全方面，通过配置OTN网络采用SNCP的保护方式。可以支持环网50ms的保护倒换时间。

（3）为客户实现的价值

- 工业光网的工业PON技术采用中心到边缘的树形组网结构，非常匹配油气行业作业区内的主站到分站的网络架构。不同作业区间采用OTN网络以支持大带宽传输，满足公司对多气矿的统一管理，并且网络具有良好的扩展性;
- 接入点的工业ONU和OLT和之间最大距离可达20km，可以满足不同分站不同点位的接入需求；OTN环网两节点间跨段支持100km以上，可以满足不同距离的作业区组环的要求;
- 工业级的OTN/OLT/ONU设置可支持-40¯70度工业宽温、工业级防护、双电源保护等，使油气室外应用更加可靠;

- 油气传输距离远，工业光网具备丰富的光路诊断和检测能力，可进行m级精准断纤检测机制，精确管理网络和报障维护;
- 工业光网可提供端到端的双链路备份传输，光纤中断后可实现ms级的链路切换，具有很高的可靠性。

5. 工业光网在搭建光产品自动化测试平台的应用

（1）网络的特点和面临的挑战

工业自动化产品测试平台是工业企业针对生产的产品在制造阶段性能测试环节搭建的自动化工具。它将产品性能测试环节所需要的仪器仪表和被测的生产件通过网络进行连接，采用集中控制的方式操作仪器仪表进行远程测试，并可以通过配置自动化脚本实现对生产件的自动测试和定时测试，测试的数据可以在平台中存储、分析。

搭建工业自动化产品测试平台时需要做到：生产无间断，消除仪表因素对生产的影响；缩短整体测试时间，规避人员操作因素的影响，加速产品及资金周转；高效利用昂贵的光仪表，既充分发挥各项功能，又实现更好地维护保养。

（2）工业光网的应用

某企业通过工业光网搭建的海量光产品调试、测量自动化平台（光仪表云），很好的解决了企业在制造阶段产品性能测试环节的生产瓶颈问题。

通过工业光网搭建工业自动化测试平台的网络架构图见图 8，网络部署方案包括:

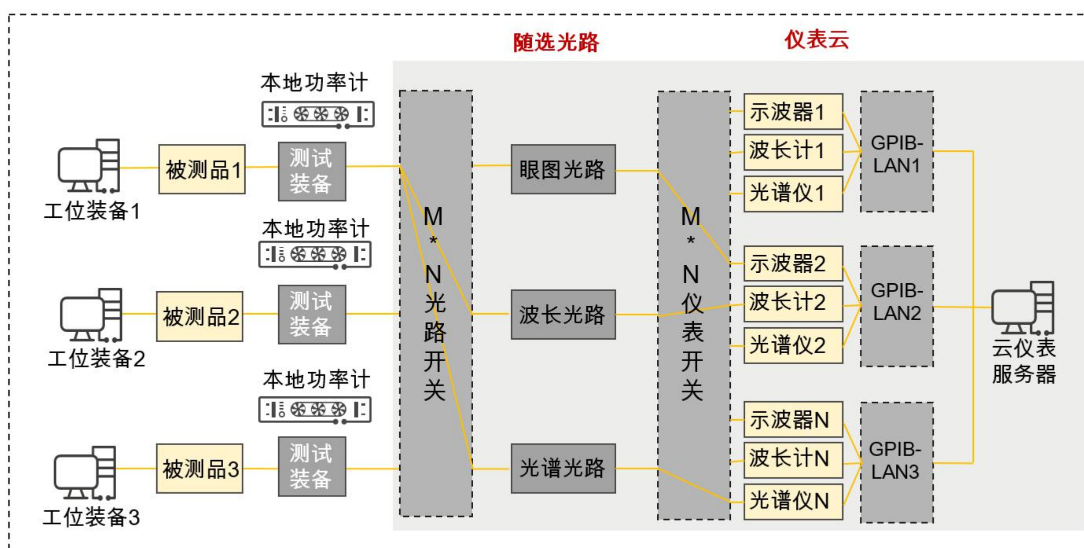


图 8 光仪表云总体架构图

- 网络架构中将仪表形成仪表云，按需调用，改善之前被测品光指标测试要经过多个工位才能完成。周转次数多，操作复杂，重复动作多的问题。在逻辑功能上划分为仪表云本身及配套的光路选择两部分；
- 物理上将可集中部署的仪表统一放置在控温控湿的仪表室内，由专业人员统一管理维护及定期标定，以确保仪表处于正常工作状态。对于光纤连接采用熔接/缠绕包裹等方式，以降低光纤连接损耗；
- 通过工业光网的全光交换技术搭建自动化测试平台连接仪表云中的测试仪表与被测装备，通过云仪表服务器控制采用全光交换随选路径，以使用仪表云中的仪表对装备执行测试；
- 一台光仪表具备多项功能，在测试时往往需要处理上传测试数据后才能进行下一项工作，这导致在测试多项指标时出现等待，延长了整体测试时间。可将仪表通过虚拟化，分解为

多项逻辑功能。通过对多台仪表逻辑功能的小颗粒化调度，可以实现对同一设备多项指标不间断的测试，节约测试时间。同时一台仪表也可被动态调用于不同设备的测试，提高了仪表利用率；

- 由于不同产线的工位数量不同，测试项目也有不同，需要结合仪表云的能力做各工序的编排，采用人工事前预配置效率低，采用固定编排也不适应产线柔性工作，灵活性差。通过自动化测试平台对测试仪表和被测装备进行全连接后，结合智能编排算法，通过令牌环动态分配仪表的逻辑功能、按预测总用时最短的组合编排测试过程，从而实现最优编排。

（3）为客户实现的价值

- 通过仪表云化，将昂贵的光仪表资源池化，规避了仪表故障/维修/保养对生产操作的影响，保证整体产线的稼动率最优；
- 在组网技术上，通过工业光网的全光交换技术搭建的工业自动化测试平台将全厂区（2km内)光检测需求集中，并通过虚拟化，将仪表分解多个可独立调度的逻辑功能，实现仪表资源供给池化。此外通过智能随需编排功能，实现需求的自动预测与资源的自动编排，简化了操作，节约了整体测试时间；
- 光产品自动化测试平台（仪表云）运行多年，相应制造/测试工序无间断；相比传统的测试检验环节，其平均测试时间缩短了10%，加快了相应产品的成本和资金周转率；新的制造、测试工序上线时间仅为之前的50%；节约了仪表采购/维

工业互联网产业联盟 Alliance of Industrial Internet

护费。方案具有很好的参考借鉴价值。

三、工业光网的典型技术

（一）工业 OTN

1. 技术背景

OTN 是光传送网（Optical Transport Network）的简称，是继 SDH 和 WDM 技术之后的新一代大颗粒光网络传输技术，目前已广泛应用在运营商网络和行业专网。OTN 技术是电域和光域技术的融合，其中电域采用基于容器的业务承载方式，支持大颗粒业务的直接映射。光域以 WDM（波分复用）技术为基础，引入了丰富的光层管理维护开销，可根据用户的实际应用需求选择。

工业 OTN 不仅具有 OTN 光域和电域的技术特点，还可适用于复杂的工业场景，需要针对高低温范围、湿度、防尘、供电方式等进行相应的加强和改进，以便为工业企业提供可靠的大容量、远距离传输，此外在一些工业场景下还可以应用其小颗粒技术为网络提供精细化的承载和维护管理能力。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

2. 在工业互联网网络体系架构中的位置

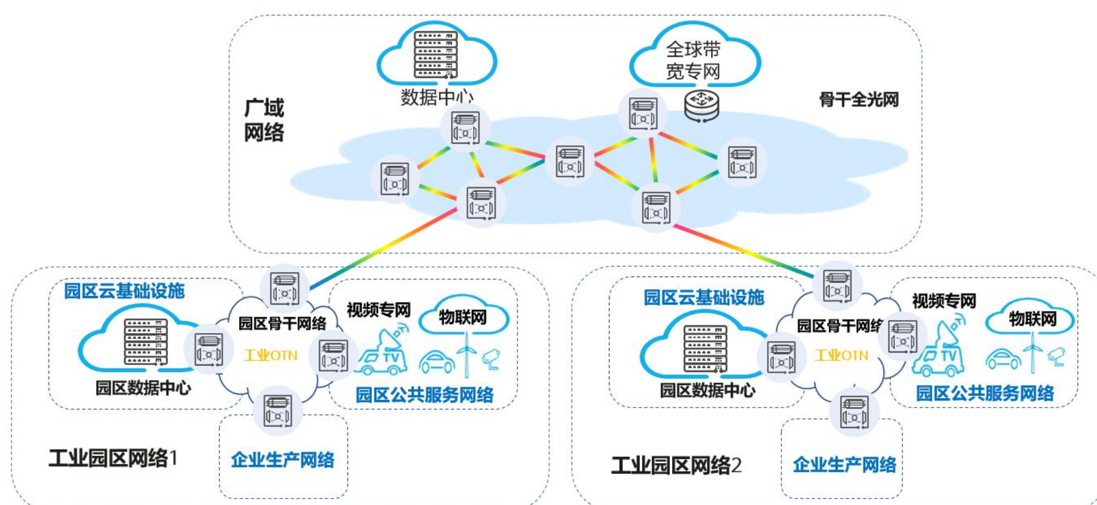


图 9 工业 OTN 在工业互联网网络体系架构中的位置

工业 OTN 在工业互联网网络体系架构中的位置见图 9。根据 OTN 技术的特点，在工业园区内可通过工业 OTN 构建园区骨干网络，提供企业网络和园区公共服务网络及云数据中心的互联。在工业园区间，OTN 技术可用于不同园区间的网络协同、园区与公有云/公用客户网络的连接。一些工业园区在其前期的工业网络中已经部署了基于 SDH/MSTP 技术的业务承载网络，但随着生产的数字化转型，生产规模不断扩大，自动化设备和监控设备的增加等，需要对业务传送网进行升级和扩容，工业 OTN 可作为优选的解决方案。

3. 针对工业网络需求的相关技术应用

- 支持业务透明承载

工业OTN的接口定义遵循国际标准ITU-T G.709的规定，支持多种业务类型信号的映射封装，支持大颗粒业务直接映射的帧适配方式，传输效率高。此外工业OTN不对数据帧封装的业务进行任何更改，

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

保证了数据传输的“透明度”，满足工业企业对生产信息的安全性要求。

- 保护机制丰富

工业 OTN 设备提供了丰富的可靠性和网络生存性机制，不仅硬件设备可以满足复杂工业场景的环境和应用要求，在组网上还具有多种保护机制，可以分别基于 OTN 网络的光层、电层执行链路的保护与恢复策略，且保护恢复时间满足电信级要求，小于 50ms。

- OSU OTN

工业生产网中，传统E1/2M等小颗粒业务在网络中的直接承载，需要通过多次映射后进行传输。OSU OTN技术在现有的OTN架构体系的基础上，定义了灵活弹性的新容器，可以提供小颗粒度业务（颗粒度可达2M）的直接映射，从而简化网络架构，提高了带宽利用率，这对传输2M业务的工业网络具有很好的适用性。

4. 为用户实现的价值

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

- 满足园区互联带宽需求

工业OTN可以提供大带宽的传输通道，支持100G以上的接口速率，能够满足工业园区骨干网络或园区间协同的网络带宽需求。

- 提供低时延/低抖动的网络互联

时延稳定性是低时延网络的品质保障，缺乏稳定性的时延，片刻的故障甚至抖动都会给用户带来不可预计的损失。工业OTN在提供高带宽的同时，可以保证端到端网络的低时延/低抖动稳定性。

- 灵活组网

针对工业园区骨干网络或园区间协同网络中复杂的工业应用场景，工业OTN支持多种组网拓扑，包括环形、链型、环带链等组网结构，并可提供光层业务调度、电层业务调度和混合业务调度，支持灵活的组网方式。

- 运维便捷

提供统一运维管理平台，实现网络可视化：直观显示业务状态信息，实时监控和显示业务时延数据；业务下发自动化：自动部署，集中调度资源，业务快速开通；运维智能化：自动检查网络状态，提供资源健康、故障风险识别等报表，提升运维效率。

（二） 工业 PON

1. 技术背景

工业 PON 系统由局端 OLT(光线路终端)、用户端 ONU(光网络单元)、连接局端和用户端设备的 ODN(光分配网络)组成，具体架构可见图 10，采用单纤双向、点到多点的网络结构。下行方向（OLT 到 ONU）为广播选收，上行方向（ONU 到 OLT）采用时分多址接入（TDMA）方式对各 ONU 的数据发送进行调度。ODN 由光纤和一个或者多个无源光分路器等无源光器件组成，在 OLT 和 ONU 之间采用光纤连接。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

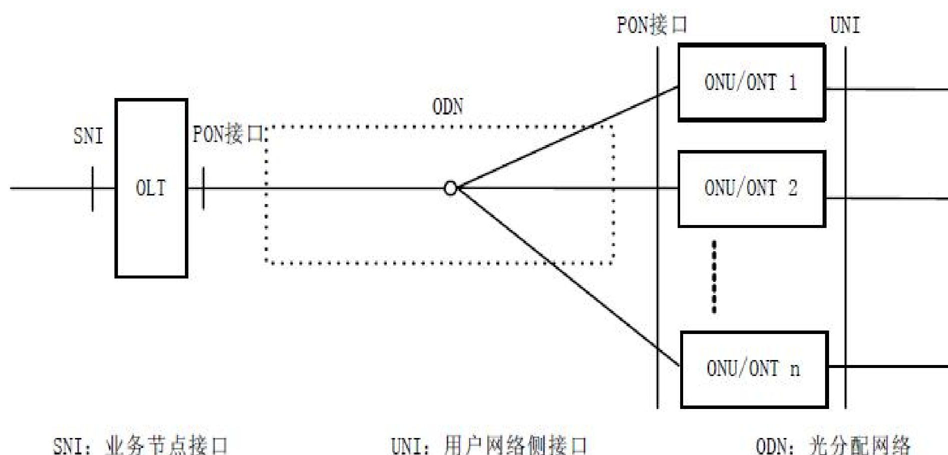


图 10 工业 PON 系统参考架构

相较于传统铜缆以太网技术，PON 技术具有以下优点：通过无源器件组网，受电磁干扰和雷电影响较小；采用自愈形网络支持并联，切换时间短、抵抗失效能力强；点到多点传输架构，终端并行接入，部署灵活；仅需单根光纤传输，最远可覆盖 20 公里范围。

在工业 PON 系统中，除具有传统 PON 系统的功能外，接入网关（ONU）还可以作为开放平台，配置多种嵌入式数据采集功能，包括 OPC 数据采集、数据处理等，支持网关与 PLC、生产管理系统、生产装备的通信。同时，ONU 支持集成开源或者客户定制化的工业应用，进行个性化工业数据采集和转换处理，并与工业云平台进行交互。在部署工业 PON 系统时，OLT 设备提供集中化的数据处理、交换和控制功能。ONU 设备处于终端侧，可以提供以太网 RJ45、Wi-Fi 等多种常规网络用户侧接口，以及 RS485/RS232、CAN 等多种工业类型的业务接口。ONU 设备采集的工业生产数据经过 ODN 网络汇聚到 OLT 设备侧，由 OLT 设备北向接口传输给企业信息网络的上层实体（如云平台服务器、MES 系统等），以实现数据采集、生产指令下达等功能。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

2. 在工业互联网网络体系架构中的位置

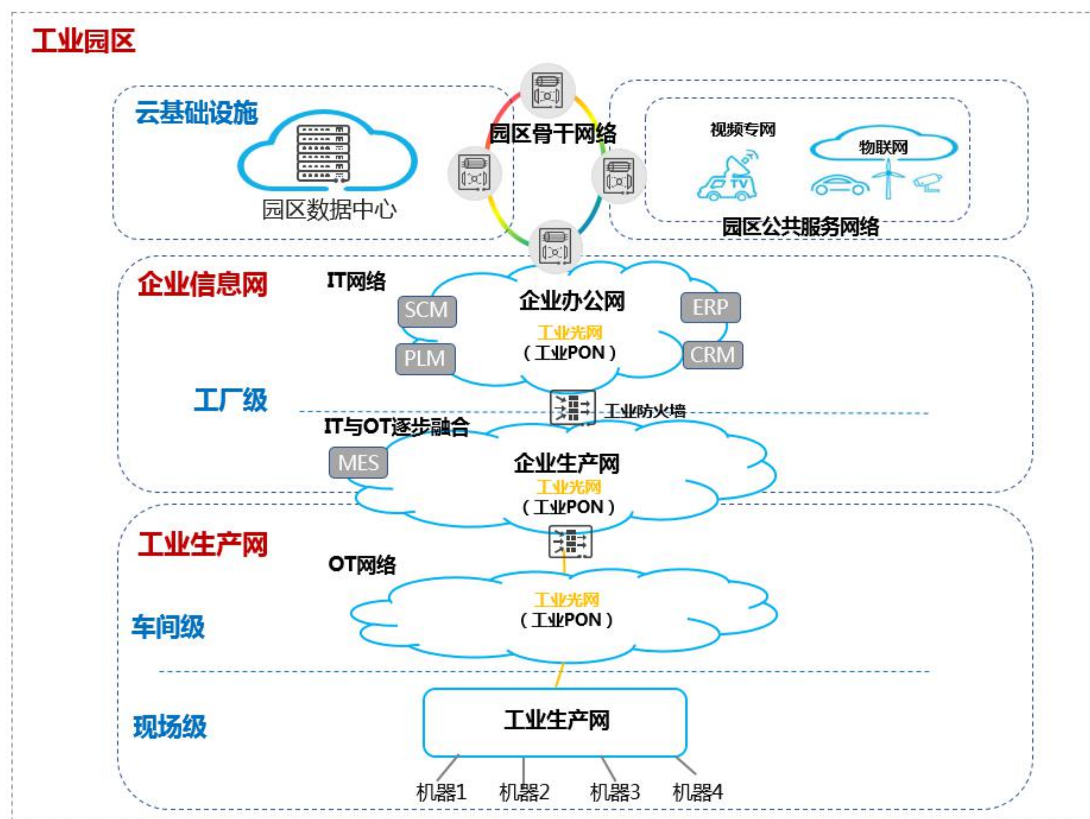


图 11 工业 PON 在工业互联网网络体系架构中的位置

工业 PON 在工业互联网网络体系架构中的位置见图 11，参考工业互联网产业联盟发布的《工业互联网体系架构（版本 2.0）》白皮书和《工业 PON2.0》白皮书。工业 PON 技术在工业互联网体系架构中主要应用在工业生产网络中的车间级网络位置。即通过工业级接入网关（ONU）设备实现光网络到设备层的连接，通过光分配网络实现工业设备数据、生产数据等到汇聚网关（OLT）的集中，最终通过汇聚网关（OLT）与企业 IT 网络的对接，从而实现企业 OT 和 IT 融合组网及工业数据的可靠有效传输。此外，工业 PON 也可应用在工厂级网络的企业办公网中，用于承载企业的管理信息数据，并按需将数据上传至工业网络的骨干节点。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

3. 针对工业网络需求的相关技术应用

- 低时延技术

工业PON系统下行采用广播选收机制，可以保证稳定的传输时延，一般可达100μs量级；上行方向的TDMA机制经过优化以后，也可达到200μs量级的时延能力；未来通过进一步的传输机制优化，将具备更低时延的性能。

- 数据安全机制

工业PON的ONU终端接入需要网管系统进行统一认证注册，避免了仿冒终端接入的安全隐患；数据传输支持多种加密算法（国密、AES等），具备成熟可靠的网络传输安全传输机制。

- 网络切片

工业PON具备网络切片能力，一台物理OLT设备可以虚拟化为多个逻辑OLT设备切片，每个切片之间的网络资源分配、系统管理权限相互独立，在用户角度来看等同于多台独立的物理设备，这种网络切片可以用于对工业企业多种业务子网的融合承载。

- 边缘计算

工业PON设备可支持基于通用硬件架构和软件平台的边缘计算能力，将工业产线的数据计算处理能力转移到边缘侧，并通过结合特有的深度学习算法，在边缘测进行模型推理，可有效降低传输时延。针对一些机器视觉类业务，还可以降低视频类数据传输带宽，提升计算效率。

- 开放平台技术

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业PON提供开放的软硬件平台架构，通过容器和应用分离技术赋能多厂商协同实现工业协议转换，实现工业现场协议转换功能，完成异构通信协议到统一协议的映射。工业PON ONU设备开放平台的架构见图12。

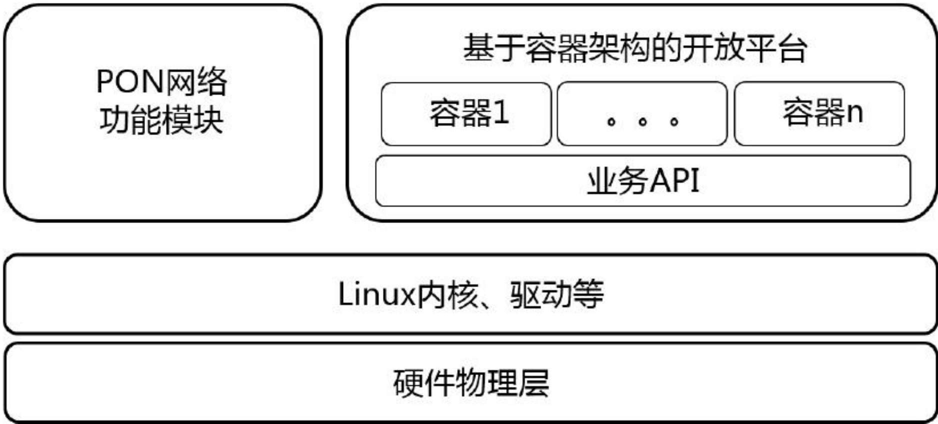


图 12 ONU 侧开放平台的架构

接入网关(ONU)软件由平台软件和应用软件组成。平台软件支持容器功能和应用软件管理功能。平台容器提供软件支撑环境，应用软件（插件）实现协议转换及其它工业数据处理及分析功能，支持多个厂家协同实现特定协议到统一协议的转换或多种协议互转。开放软件平台基于容器技术为第三方应用提供运行空间和所需的运行资源，并提供统一的 API 接口，屏蔽不同硬件的差异，保证第三方应用的跨硬件可用性。

4. 为用户实现的价值

- 满足车间级应用的带宽承载需求

工业PON网络中的ONU设备支持上下行最大10Gbit/s的传输速率，可满足车间级应用的多业务承载；未来还具备向50Gbit/s速率演进的能力。

● 支持复杂的工业场景应用

工业PON网络采用无源器件组网，不会受到电磁干扰和雷电影响;网络部署时支持采用自愈环形网络部署，切换时间短、抵抗失效能力强。

● 网络部署便捷

采用点到多点传输架构，支持终端设备并行接入，最远可覆盖20公里范围，并且工业PON采用的预置连接头、光电混合缆等技术使施工现场无需熔纤，布线和施工简便快捷。此外工业PON具有无源光网络的设备特点，光分配网络无需取电，降低了网络的部署难度和要求。

● 提供网络保障策略

为保障工业生产网络安全可靠，工业PON技术具备多种等级的保护倒换方案，可以在一路ODN网络或者PON设备端口发生故障导致网络中断时，快速进行主备链路切换和业务恢复，保证工业场景对于系统高可靠性的要求。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（三）工业光总线

1. 技术背景

目前工厂内现场级网络连接，在一些强电干扰环境下存在可靠性不高、维护方式落后的问题。另一方面，机器视觉等新兴技术开始广泛应用；用户不断变化的需求也促使传统制造方式向柔性制造转变，产线组合变化加快，灵活性要求高，同时又要兼顾带宽的提

升和传统现场级的高精度控制能力。这些变化对网络提出了新的要求。

实际工业应用中，工业生产网络的现场级控制网络对时延/抖动的要求最高，其中，运动控制业务通常要求小于100微秒级的低时延、小于100纳秒级的低抖动以及99.9999%极的高可靠性，而随着机器视觉、AI等新兴技术的应用，网络带宽需求迅速增加，其中高清晰度视觉检测业务便可产生高达2Gbit/s的峰值带宽。针对当前现场级工业控制网络灵活性、带宽需求逐步增加、时延和抖动要求高的趋势，工业光网在PLC以下定义了工业光总线。

工业光总线是将工业总线技术与光网络技术结合以提供现场级终端设备总线互联的网络技术。不只是将传统的工业现场总线与光纤媒质简单组合，而是为实现更高带宽、高灵活性和低时延的网络建设目标，采用光网络技术对数据传输方式和交互机制进行优化，从而为现场级网络提供更具竞争力的性能指标，以满足企业数字化转型对网络提出的更高要求。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

2. 在工业互联网网络体系架构中的位置

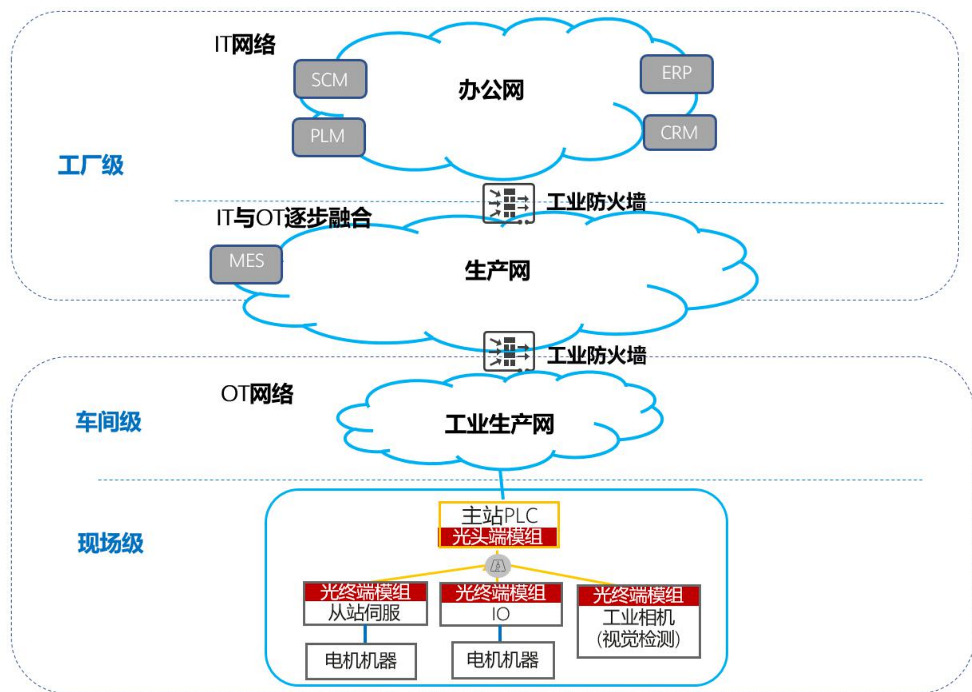


图 13 工业光总线在工业互联网网络体系架构中的位置

在工业互联网体系架构中，工业光总线技术定位在现场级控制网络（见图 13）。图中所示的新型工业光总线技术采用在主站 PLC 侧内置光头端模组，在从站伺服、IO、工业相机等设备中内置光终端模组的方式，并通过星型结构光分配网络进行组网，实现主站 PLC 到从站设备控制数据的有效传输。

工业光总线技术优化了物理层和数据链路层的数据传输方式，其中数据链路层将原有工业协议的串行通信机制改为并行，并通过缩短数据传输周期来降低物理链路层的时延。新型的工业光总线技术有以下两种工作模式：

常用工业协议	工作模式一	工作模式二
应用层	原有工业协议	优化的新工业协议
数据链路层	光数据链路层	光数据链路层
物理层	光物理层	光物理层

工作模式一：工业光总线技术定义了物理层和数据链路层的数据传输方式，但对原有的工业协议进行透传，不改变原有工业协议中的各类数据，如 Modbus，EtherCAT，ProfiNet，ProfiBus，CC-LINK 等。仅将数据载入到总线通信报文的净荷中传送到对端。受限于原有的上层工业协议交互机制，此工作模式对降低系统总时延的改进有限。

工作模式二：工业光总线技术定义了物理层和数据链路层的数据传输方式，同时在应用层采用优化后的新工业协议，其关键的改进为：优化后的应用层工业协议，配合底层的并行通信机制，降低了 PLC 的循环周期，从而达到未来工业应用要求的确定性时延和可靠性传输。

3. 针对工业网络需求的相关技术应用

- 全光连接

采用光纤传输并可通过光分配网络的多级分光技术组网。主站和主站、主站和从站间通过光纤、分光器等无源器件连接，抗干扰性强，并提供了工业现场终端的灵活接入能力。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

- 并行数据处理

在优化的工业总线协议中，通过优化数据链路层，每个时隙内，每个从站均可并行向上发送数据到主站。将单个从站与主站的串行通信机制，改为多个从站与主站的并行通信，使得PLC的循环周期降低。

- 确定性低时延

保证工业现场级设备的控制要求，实现主站与从站之间确定性

低时延的传输，并可采用针对性的业务传送机制，如多Burst突发（将原有数据通信的固定周期时隙划分的更小，如将125us时隙按4Burst划分成31.25us的更小时隙）、优化的QoS、光同步技术等低时延、低抖动技术，提供更优的现场级网络性能。

4. 为用户实现的价值

- 带宽平滑演进：根据场景的应用和业务发展，主站上下行带宽支持便捷的扩展升级，且现场设备的连线无需改变，仅需替换主站光网关模组的光模块；
- 支持从站远距离接入：主站和从站间通过分光器、光纤连接，支持远距离传输数据；
- 多从站接入：单主站支持多从站的接入；
- 生态友好：支持现有工业协议的透传，如Modbus，EtherCAT，ProfiNet，ProfiBus，CC-LINK等；
- 安全可靠：工业光总线方案通过无源器件组网，具备多种组网保护方式，同时，光纤不受到电磁干扰和雷电影响，光器件/光模组遵从工业级环境和散热标准。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（四）其他

1. 全光交换技术

全光交换技术采用光矩阵提供不同光传输方向之间光信号的交换能力。在工业领域可用于构建工业企业的自动化测试和巡检平台。

全光交换主要由光支路单元、光线路单元、光交叉连接矩阵功能单元和管理控制单元组成，各部分的连接示意图见14。



图14 全光交换结构示意图

图中光矩阵为光支路单元、光线路单元提供了全连接的光层交换的能力，从而可将业务信号向任意方向交换。光支路单元提供了业务数据的光信号的快速接入能力，并通过光矩阵调度到任意方向的光线路单元实现线路传输。光线路单元提供了光信号在线路方向上的传送能力，每个线路单元代表不同的传输方向，并且相互保持隔离。管理控制单元提供对光矩阵、光支路单元和光线路单元的数字化监控能力，实现业务传输信息可视化，简化了运维。

随着工业企业进行数字化生产和智能化网络改造，企业对生产环境的按期检测是保证生产质量的重要环节，传统的检测方式是将检测仪表经过多个待检的工位以完成检测，周期次数多，操作复杂。通过全光交换技术搭建自动化的测试平台。只需将全部检测仪表统一集中在仪表室与工业全关交换节点相连，运维人员通过网管远程配置光开关通道进行快速选路，选择测试仪器连接希望被测的终端设备，即可完成检测任务。

基于全光交换构建的自动化测试平台特点如下:

- 提高了生产管理自动化水平，易用性强

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

通过全光交换技术构建的测试平台采用自动化远程操作代替传统的人工检测的生产管理方式，可对接入测试点的数据进行集中存储和分析。在使用方面，基于全光交换技术的自动化测试平台采用了板卡式内部集成的全光互联的设计方法，避免了需要运维人员手动连接光纤配置测试方向，提高了易用性。

- 业务透明交换，保证信息安全

全光交换可支持多维度的信号交换，可以实现多被测点和测试仪器的接入，信号在光层即可完成多维度的交换，无需解析到电层进行处理，实现了对测试数据的透明传送。可以满足工业企业对生产信息安全的要求。

- 降低功耗，节约成本

全光交换在光层实现业务的调度和交换降低了设备整体功耗，节约了能源，节省了成本。

- 核心器件可靠性高，自主可控

全光交换的核心器件采用成熟的 LCoS（硅基液晶）技术。该技术产业链成熟，器件产能、可靠性稳定，且自主可控。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

2. ODN 简化部署和运维技术

ODN 是光分配网络的简称，是工业光网 PON 设备中连接光线路终端 OLT 和光网络单元 ONU 之间的光纤和设备的总称，其作用是实现点（OLT）对多点（ONU）的连接，并根据接入节点数量合理分配光功率，在 OLT 和 ONU 之间提供光信号传输的物理通道。

ODN 主要由光纤光缆、光衰减器、光纤接头、光连接器、分光器等无源器件组成。结构如图 15 所示:

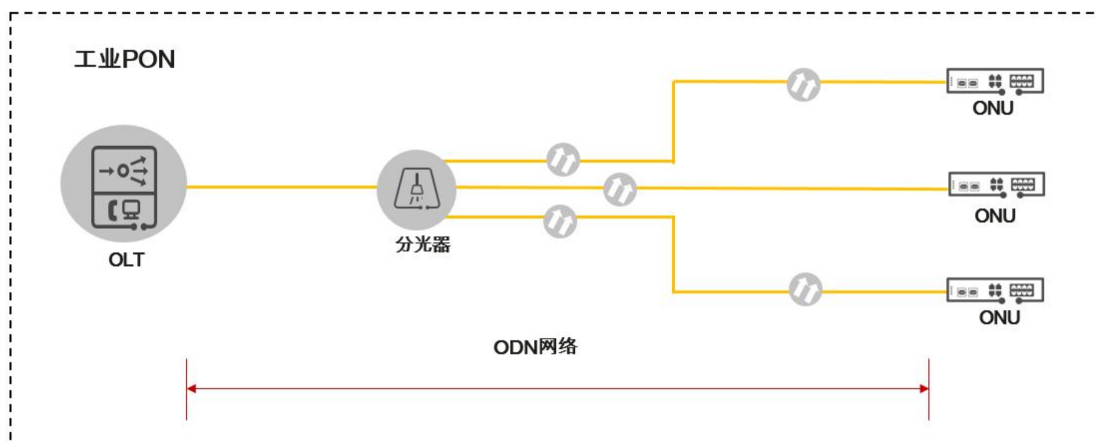


图 15 ODN 网络结构图

在工业网络部署 ODN 时。为保证快速部署并降低维护的难度。需要快捷、易操作的部署方式和智能、准确的管理运维方法。

ODN 在工业网络中的简化部署和运维技术如下：

- 预置连接头

由于 ODN 网络采用点到多点的拓扑，网络中接续节点多。为避免在工业网络全网部署时再进行光纤熔接，加快部署速度，可进行光纤连接头的端到端预连接，使在工业现场部署 ODN 网络时可以实现光纤的即插即用。

- 不等比分光

工业光网 PON 采用点到多点的网络结构，但在一些工业场景下（如管廊、井下等），需要长距离链式组网并提供对链路的保护。采用不等比分光组网可以支持多级串联的网络结构，结合手拉手的设备连接方式可以提供可靠的链路保护。

- 超柔蝶形光纤

蝶形光纤（微光缆）两侧有纤维加强筋，可承受拉力达 70~200N。该光纤采用 G.657B3 标准，最小弯曲半径为 5mm，可灵活

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

适应布线施工过程中常见的多种转弯角情形，能有效满足各类工程环境的要求。

- 光电混合缆

光电混合缆是一种新型的接入方式，它集成了光纤和馈电线于一体，同时解决了光纤通信和设备用电的问题，并且在传输过程中光信号与电信号不会发生相互的干扰现象，既保留了普通光纤的传输特性还能满足输电电缆的相关要求。在工业光网中应用时，可降低网络布线的工作量，降低施工难度。

- 网络拓扑实时可视可管

提供统一运维管理平台，实现对 ODN 网络拓扑整体资源、设备端口占用状态、下挂设备及用户信息等信息的可视可管，并支持按需划分管理范围。

四、工业光网的建设建议

（一）建设目标

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业光网的建设目标是帮助企业构建全要素、全产业链互联互通的新型网络基础设施，着重满足工业企业实际生产和管理需求，从建设场景上看，适用于工厂新建网络和工厂网络升级改造两种情况。 从建设的覆盖范围上看，工业光网的建设范围可覆盖企业/园区内的工业生产网络、企业信息网络以及企业/园区外的国家骨干传输网络，可建设全网端到端的网络互联体系。

（二）建设原则

工业光网建设需要综合考虑工业企业的实际情况，在满足工业企业现场环境和生产、管理需求的基础上，提供高可靠、高安全和充足性能的网络基础设施，并兼顾考虑工业企业发展信息化、数字化、智能化的过程中需要在网络设施和网络能力方面予以适当预留，最终以合适的成本为工业企业部署工业光网。在建设过程中需要关注以下几点:

（1）网络性能稳定、安全，充分满足工业企业生产、管理需求。

（2）满足工业现场复杂的环境和特殊的布局要求，尽量减少现场布线的层级和数量，尽量降低现场布线的操作难度。

（3）满足工业企业现存网络的兼容要求和设备利旧。

（4）灵活扩展性，从工业企业业务发展和生产特点考虑，建设方案中需要预留适当的链路和资源。

（5）成本较优，与同类型承载网络成本具备可比性，工业企业可以接受。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（三）建设思路

按照建设步骤来考虑，四项内容需要明确：一是现场勘查，需要详实掌握客户实际情况和网络需求（见附录：现场勘查，内容可供参考），二是制定满足客户需求的建设方案，包括：组网方案、设备选型及建设实施要求等内容；三是确定商业模式，一般采用以租代建、一次性建设等模式；四是确定网络运维方式，一般采用企业自运维、运营商代运维和第三方公司运维等方式。

1. 工业光网作为不同生产网间协同网络的建设思路

明确不同生产网络存在的环境和布局要求；明确不同生产网络承载业务的类型和对网络能力的需求；明确工厂级/工业园区级工业光网部署的冗余度以满足网络升级和业务调整需求；明确不同生产网络采用虚拟切片隔离还是采用物理隔离；明确不同生产网数据在云端（包括：工厂私有云、公有云）的融合汇聚问题；明确是新建网络还是网络升级，如果是网络升级还需要考虑与现有网络的兼用性和设备利旧。

2. 工业光网作为车间级网络的建设思路

明确车间环境和布局要求；明确承载业务的类型和对网络能力的需求；明确车间级工业光网部署的冗余度以满足车间后续升级和灵活调整需求；明确是新建网络还是网络升级，如果是网络升级还需要考虑与现有网络承载业务的隔离问题和生产数据在边缘侧（设备侧/车间侧）融合汇聚及设备利旧。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

3. 工业光网作为现场级全光联接的实施思路

明确工业生产现场环境和布局要求；明确生产控制网络对带宽、时延、抖动等性能要求。在部署方式上可以通过与生产装备制造商合作的方式，将光总线技术集成到产线设备中实现工业现场级的全光联接。

五、工业光网的发展趋势

随着工业互联网技术的发展，工业制造企业正在逐步向网络化、

数字化、智能化方向的前进。为顺应这种趋势，工业光网也在不断演进发展和完善。本白皮书的起草单位中国信通院、华为、中国电信也在联合产业链的伙伴积极探索工业光网的发展方向和新的行业应用。其中，中国电信联合主流厂商在行业里探讨下一代工业PON网络特性，重点关注边缘计算、低时延技术、网络和业务安全保障能力、开放的工业平台和工业APP操控等。华为也在致力于与各行业、产业链深度合作制定满足未来制造业现场级生产网带宽、时延、抖动需求的全光总线工业光网解决方案。总的来说，工业光网作为新兴的工业互联网组网技术，在发展的过程中需要逐步适配以满足各类复杂工业场景的应用部署，还要支持企业在新的生产经营模式下对网络不断增长的功能和性能要求，并逐步扩大工业领域对先进光网络技术的认知和理解，以助力企业的数字化、智能化转型升级。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

附录：现场勘查

通过收集如下信息来把握客户整体需求:

（1） 客户所处行业。

（2） 客户工厂规模。

（3） 客户对于网络建设或改造的需求，想解决什么问题。

（4） 现有网络状况和利旧需求。

（5） 客户预算

1. 网络能力需求

在勘查时需了解客户对不同网络的性能需求，具体内容见表 1:

表 1: 客户业务特征及网络能力需求

需关注的网络性能	承载业务类型			
	办公网络	视频监控网络	生产网络	物联网络
接入信息点数量	○○○	○○	○○	○○
设备类型	○○	○	○○	○
接入设备供电方式	○	○○	○	○
信息点冗余	○○	○	○○	○
带宽需求	○○	○○○	○	○
时延抖动等参数	○	○	○○○	○
丢包率	○	○	○○○	○
安全性	○	○	○○○	○
保护倒换	○	○	○○○	○
注：“○”表示该项目在对应场景中的重要程度（供参考），“○”的数量越多表示越重要。				

工业互联网产业联盟 Alliance of Industrial Internet

2. 现场布局调研

在勘查时需了解现场布局情况，具体内容见表 2：

表 2：现场勘查内容

现场情况	布局情况
企业机房	供电条件、空间条件、空调条件等
覆盖面积	客户厂区面积、信息点分布
建筑物形态	低层、高层、中心机房位置
工业现场环境	高低温、粉尘、电磁兼容性、防爆等特殊的，和客户实际行业有关的现场环境特殊需求
现场特殊需求	架线还是地下等方式，对最终成本有影响

3. 网络运维模式

网络运维服务分为两部分内容，网管系统和运维团队。

就网管系统而言，一般有两种方式：

（1）集中模式：运营商提供统一的网管系统对工业网络进行管理，这种情况下，网管系统位于运营商机房，工业 PON 网络需要与运营商网络具备公网或者专线连接，由运营商的网络运维人员可代为操作工厂内网的管理。

（2）专用模式：网管系统位于工厂机房内，不需具备外网连接要求。工业企业可直接登录和操作网管，电信运维人员可按需上门或者通过远程方式进行协助运维。

就运维团队的选择而言，一般有三种方式：

（1）工业企业自己运维，需有专用的网管系统部署在工厂机房，由工业企业自主运维。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（2）运营商代运维，当工业企业采用集中网管系统部署在运营商机房时，需采用运营商代运维方式。

（3）第三方公司代运维，需有专用的网管系统部署在工厂机房，由工业企业选择将网络运维工作交由第三方公司实施。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet